

激光与光电子学进展

激光功率对异种钢激光焊接接头组织与性能的影响

刘海^{1,2}, 陈辉^{1*}

¹西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031;

²四川化工职业技术学院机械工程学院, 四川 泸州 646005

摘要 采用单激光技术对 5 mm 厚的 Q345B 低合金钢和 304 不锈钢进行焊接。通过调整激光功率, 对不同工艺参数下异种钢焊接接头的焊缝宏观形貌、金相组织、显微硬度及抗拉强度进行分析。结果表明: 当激光功率小于 4 kW 时焊缝不能完全焊透, 大于 7 kW 时焊缝又会焊穿塌陷; 在激光功率由 4 kW 增加到 7 kW 的过程中, 焊缝组织均为典型的板条状马氏体, 激光功率为 6 kW 时焊缝中心的硬度最大, 且焊缝的气孔数量最少; 试样拉伸断裂位置均在 Q345B 母材上, 没有在焊缝上断裂; 焊缝中主要包含 γ -Fe、 α -Fe、 Cr_2Ni_3 、 Fe_2Ni_3 等相, 没有出现大量 M_{23}C_6 和 σ 相等有害相。

关键词 激光光学; 激光功率; 异种钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314007

Effect of Laser Power on Microstructure and Properties of Dissimilar Steel's Laser Welded Joint

Liu Hai^{1,2}, Chen Hui^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

²Department of Mechanical Engineering, Sichuan College of Chemical Technology, Luzhou, Sichuan 646005, China

Abstract The single laser technology was used to weld 5-mm thick Q345B low-alloy steel and 304 stainless steel. By modifying laser power, the microstructure, microhardness, and tensile strength of welded joints made of dissimilar steel were analyzed under various process parameters. The results showed that the weld could not penetrate entirely when the laser power was less than 4 kW and the weld would collapse when the laser power was greater than 7 kW. The weld microstructure was typical strip martensite when the laser power was increased from 4 kW to 7 kW; the weld center hardness was maximum and the weld porosity was the lowest at 6 kW. The samples' tensile fracture sites were all present on the Q345B base material with no weld fracture. γ -Fe, α -Fe, Cr_2Ni_3 , and Fe_2Ni_3 phases dominate in welds, with little M_{23}C_6 , σ phase, and other hazardous phases.

Key words laser optics; laser power; dissimilar steel; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 350.3850

1 引言

随着科学技术的进步以及工业智能化的迅速

普及, 各个领域中对装备的各项性能都提出了更高的要求, 尤其是在极端环境下对一些特殊场合使用的材料, 既要求其具有很高的塑韧性以及强度等力

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1102100)

通信作者: *xnprpt@swjtu.edu.cn

学性能,又要求其具有耐高低温、耐腐蚀等物理化学性能,但是这些性能要求在同种材料中很难同时满足,或者即使能够同时满足,那么价格也比较高昂^[1-3]。这使得研究异种材料的焊接工艺和机理成为国内外学者关注的焦点。把价格较低的碳钢和性能较优的不锈钢异种钢焊接起来,不仅能同时发挥两种材料的优点,还能够节约成本^[4]。Q345B 属于低合金高强钢,而 304 不锈钢属于奥氏体合金钢,这两种钢在工业中的使用量较大,生产体系也完备,因此研究 Q345B 和 304 异种钢激光焊的意义重大。

激光是由专门的激光发生器发出的一种单色光,通过光纤传导到相应特制透镜上进行聚焦,最终使得光束聚焦在一点,并且对聚焦点集中输入热量^[5-11]。正是因为激光束具有这样的特性,能量的集中度能够达到 107 W/cm^2 以上。激光焊接就是利用光子轰击被焊接金属表面形成金属蒸气,蒸发的金属可以保证焊缝对激光的吸收量,如果被焊金属导热能力较好,焊缝的熔深会比较大。激光焊接是一种现代的焊接方法,具有反应迅速、效率高、光束斑点尺寸小、能量密度大、绿色环保等优点,是实现异种钢焊接的理想热源。因此,国内外学者对异种金属的激光焊接进行了大量研究。王波等^[12]利用激光对薄异种钢板进行焊接。为了优化工艺,他们采用多因素正交试验和多目标模糊综合比较法,主要研究 Q235/316 异种钢激光焊接的质量控制以及焊接工艺参数设计等问题,得到焊接参数优化的主次顺序和工艺参数最优组合。刘巨锋等^[13]采用光纤激光对 5 mm 厚的 GH4169 高温合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈

钢在不同的焊接工艺参数下进行激光焊接,结果表明:当激光功率为 4 kW,焊接速度为 1.6 m/min,离焦量为 -3 mm 时,可获得内部气孔数量最少的焊缝;激光功率在 4.0~4.4 kW,焊接速度在 1.6~2 m/min,离焦量在 -3~-1 mm 范围内的焊接参数组合,均可获得常温拉伸性能优于 1Cr18Ni9Ti 母材,600 °C 拉伸性能与 1Cr18Ni9Ti 母材相近的焊缝。Serizawa 等^[14]采用光纤激光器作为焊接热源,对 F82H 和 SUS316L 异种金属进行激光焊接,结果表明,通过改变激光焊接的位置以及对焊接接头试样进行热处理后,可得到综合性能优良的焊接接头。张岩^[15]在对钛合金和不锈钢两种材料进行异种钢激光焊的过程中,主要采用添加中间过渡层的方法,添加的 Nb、Ni 和 Cu 均有助于实现钛合金与不锈钢两种材料的连接。

本文主要分析利用激光焊接技术焊接 Q345B/304 异种钢的焊接工艺以及相关参数,通过改变激光功率来获得不同质量的焊接接头;对接头焊缝的宏观形貌、显微组织、显微硬度分布及力学性能进行对比分析,对焊接后的质量进行综合评价,以期找到利用激光焊接技术焊接 Q345B/304 异种钢的最佳工艺参数。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

激光焊接试验选择的材料是 5 mm 厚的 304 不锈钢板和 Q345B 低合金高强钢板,板材的基本尺寸为 200 mm × 100 mm。两种材料的化学成分分别如表 1 和表 2 所示,两种材料的力学性能如表 3 所示。

表 1 304 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Mass fraction / %	≤0.08	≤1.0	≤2.0	≤0.45	≤0.03	18-20	8-11

表 2 Q345B 钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of Q345B steel

Element	C	Si	Mn	P	S
Mass fraction / %	≤0.20	≤0.50	≤1.70	≤0.035	≤0.035

表 3 304 不锈钢和 Q345B 钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 304 stainless steel and Q345B steel

Material	Yield strength σ_s /MPa	Tensile strength σ_b /MPa	Elongation δ /%	Hardness /HV
304 stainless steel	≥205	≥515	≥40	≤210
Q345B steel	≥345	≥460	≥23	160-190

2.2 试验方法

经过前期文献查阅与理论分析以及预试验,制定了本试验的焊接工艺参数。根据激光焊接的特点,在保持离焦量为 0,焊接速度为 10 mm/s 以及保护气体流量等其他因素不变的情况下,分别采用 4, 5, 6, 7 kW 的激光功率进行焊接,焊接采用单面焊双面成型技术,焊接操作过程中一次焊接完成。焊接完成之后,采用放大镜和焊缝检验尺进行宏观形貌与尺寸检测分析。

首先用线切割设备对焊缝进行取样,使用水磨金相砂纸按照 280#、600#、1000#、1500# 的顺序进行打磨抛光;然后用质量分数为 4% 的硝酸酒精溶液对 Q345B 钢的一侧进行腐蚀,腐蚀时间为 15 s 左右,再用氯化铁盐酸溶液 [2.5 g FeCl_3 + 25 mL 36% (质量分数) 的盐酸 + 25 mL 水] 对 304 不锈钢侧进行擦拭腐蚀,时间为 30 s 左右。金相

试样制作完成之后,将其放置在蔡司金相显微镜 AX10 中进行微观组织观察。

采用德国布鲁克 AXS 公司生产的桌面型多晶 X 射线衍射仪对焊缝金属进行相组成分析。选用 HVS-30 数显式维氏硬度计对异种钢激光焊接接头进行硬度测试,试验载荷选用 29.4 N,载荷持续时间为 10 s;每隔 0.2 mm 选取一个点进行测量。拉伸试验依据国标 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》,按照该标准的要求,抗拉强度取同一参数下 3 个试样的算术平均值。

3 试验结果与分析

3.1 激光功率对焊缝组织形貌的影响

采用不同的激光功率对试件进行焊接,焊接接头的表面形貌如图 1 所示,截面形貌如图 2 所示。

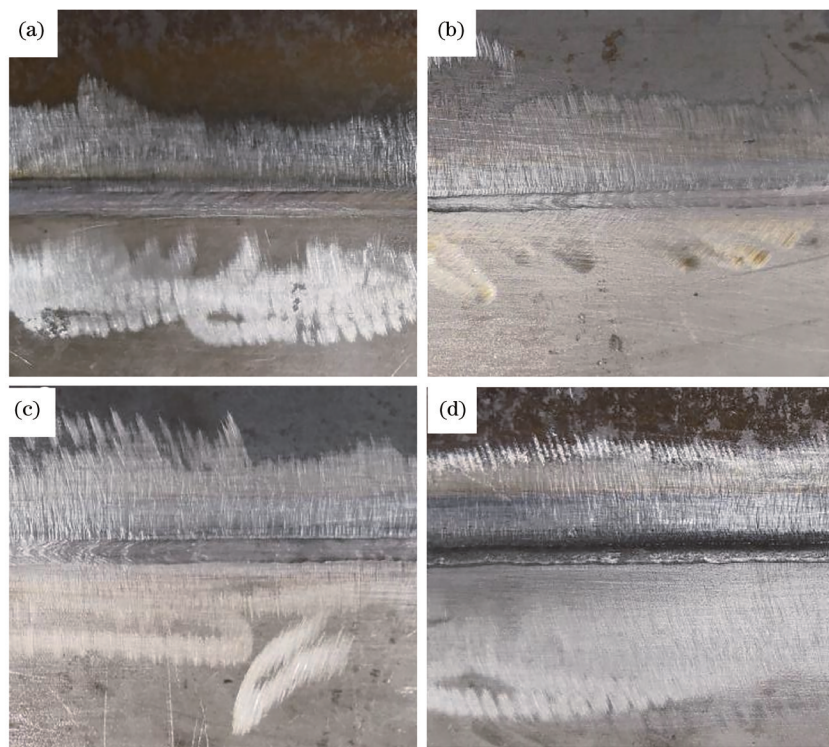


图1 不同激光功率下焊接接头的表面形貌。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 1 Surface morphologies of welded joints with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

从图 1 可以看到,虽然采用了不同的激光功率,但是焊缝的宽度并没有因为功率的变化而发生较为明显的改变。焊接完成的试件都没有出现明显的卷曲等变形,焊缝的成形也比较均匀美观,这是一些传统的焊接方法所不能比拟的。但是,随着激光功率的变化,焊缝的整体形貌还是有一些差异。从凹陷程度来看,4 kW 试样表面最为平坦,5 kW 试样表面

凹陷最厉害,6 kW 及 7 kW 试样少有凹陷。从焊缝截面形状来看:当激光功率为 4 kW 时,焊缝背面没有被焊透,呈现倒三角形;当激光功率大于 4 kW 时,焊缝都能被焊透,只是截面表现出的形态不一样,5 kW 时焊缝截面呈现倒梯形,而 6 kW 和 7 kW 的焊缝截面整体表现出上下宽、中间窄的束腰现象。此外,从图 2 可以观察到焊缝上部基本都出现了气孔,而且都是单

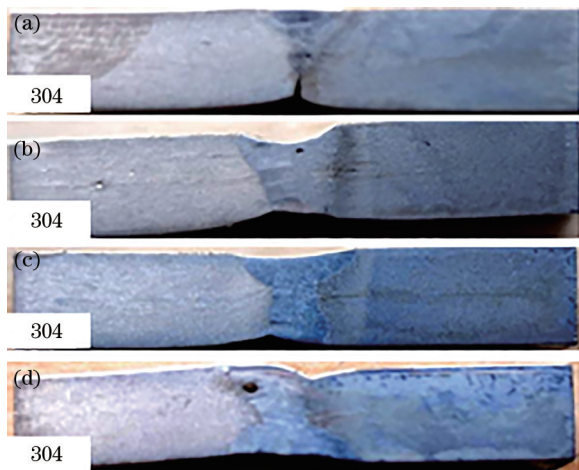


图2 不同激光功率下焊接接头的截面形貌。(a) 4 kW;
(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 2 Section morphologies of welded joints with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

独存在的大气孔,随着激光功率的增加,气孔的体积也有所增大。这主要是因为气孔的形成与熔池温度有关,但是激光功率为 6 kW 时没有出现气孔 [图 2(c)],说明在焊接速度和离焦量不变的情况下,仅仅考虑截面形貌,激光功率为 6 kW 时效果更佳。

综合图 2 所示的焊接接头的截面形貌来看, Q345B/304 异种钢焊接接头主要由 304 不锈钢侧的热影响区、熔合区、焊缝,以及 Q345B 钢侧热影响区、熔合区和热影响区组成。304 不锈钢侧热影响区十分不明显,且随功率增大未有明显变化;相比之下, Q345B 钢侧热影响区十分明显,且随着功率的增大呈现扩大的趋势。

为了能够更加准确地判断不同功率焊接的焊缝组织,采用金相显微镜和扫描电子显微镜(SEM)测量 4, 5, 6, 7 kW 激光功率下焊缝的微观形貌,如图 3 和图 4 所示。在不同功率下,无论是金相显微照片还是 SEM 照片,均出现大量细长的条状及板状组织,为典型的板条状马氏体组织。从图 4(c)对应的 6 kW 下的焊缝组织的 SEM 图可以看到大量的板条束,每一个板条束内存在很多近似平行排列的细长马氏体板条。由于板条马氏体的板条群尺寸越小,单位体积内的晶界越多,马氏体相界面对位错运动的阻碍作用越强,马氏体的强度越高。相比之下,图 4(d)所示的 7 kW 下的焊缝组织和 6 kW 下的焊缝组织类似,而图 4(a)所示的 4 kW 下的焊缝组织所呈现的马氏体板条数量较多,5 kW 的次之。

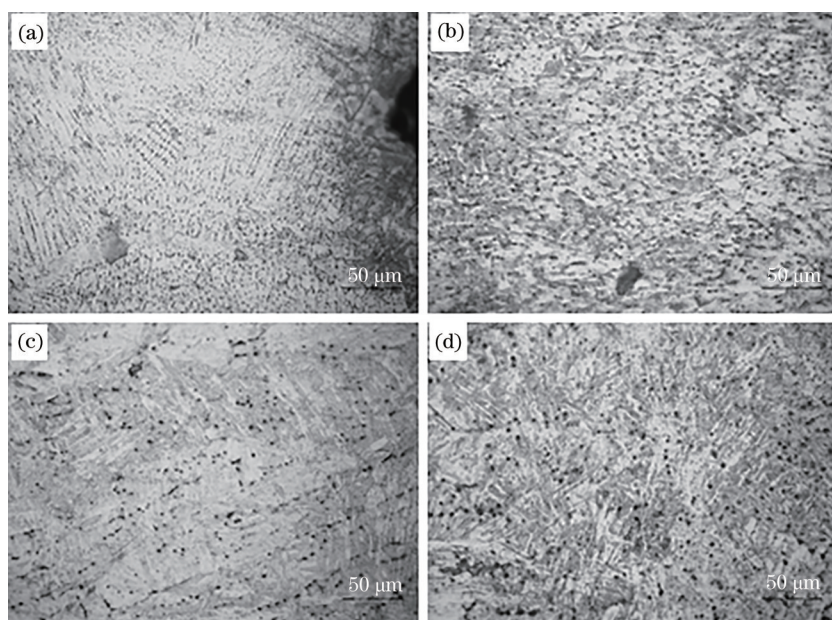


图3 不同激光功率下焊缝的金相照片。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 3 Metallographic photos of welds with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

3.2 激光功率对焊接接头硬度的影响

图 5 所示为使用不同激光功率焊接时接头的显微硬度值,可以看到焊缝的硬度值分布趋势基本一致,在整个焊接接头内焊缝区的硬度最大。在 4 kW 功率下,焊缝区产生了大量的板条状马氏体,使得

焊缝的硬度远远高于两侧的母材硬度。在激光功率从 4 kW 增大到 7 kW 的过程中,焊缝中心的硬度值在 7 kW 时达到最小值,在 6 kW 时达到最大值,这一点可以由 3.1 节所分析得出的 6 kW 下焊缝组织含有大量的板条束这一结果相佐证。此外,不同

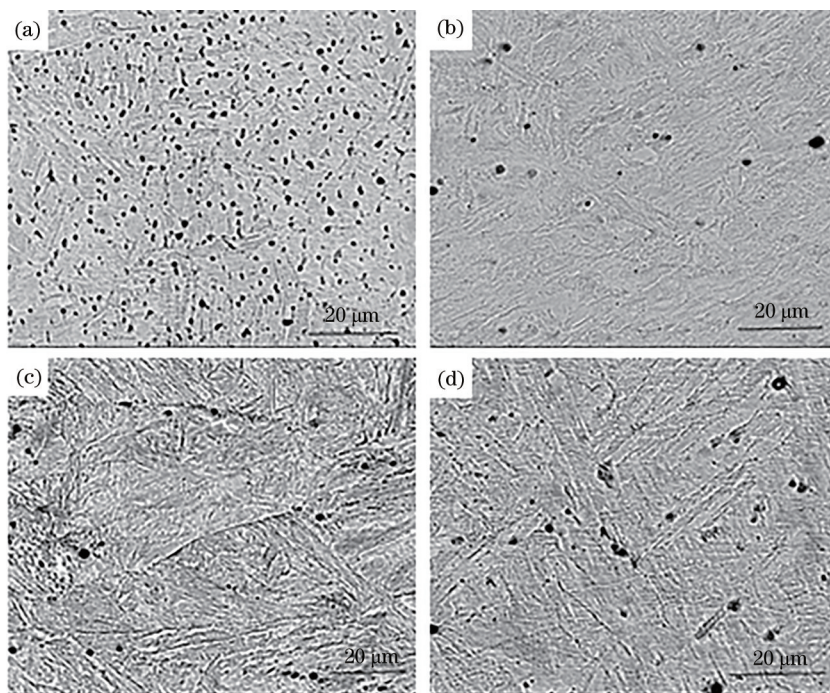


图4 不同激光功率下焊缝的SEM照片。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 4 SEM photos of welds with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

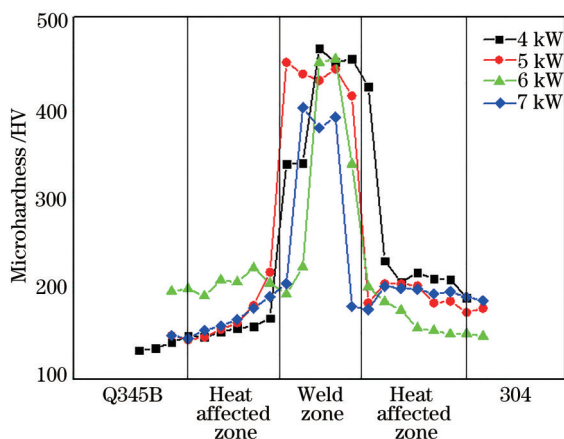


图5 不同激光功率下焊接接头的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of welded joints with different laser powers

激光功率下4组试样的热影响区硬度都明显降低,这与热影响区受到温度影响,组织变得粗大柔软有关,而且功率越大,热影响区的软化越明显。同时,

从硬度曲线在熔合区到母材区的变化趋势来看,304不锈钢侧熔合区硬度先出现回升然后缓慢下降,且下降幅度不大,而Q345B钢侧的熔合区硬度则持续下降,这与图2中显示的304不锈钢的热影响区范围小于Q345B钢的热影响区的结果相佐证。

3.3 激光功率对焊接接头拉伸性能的影响

不同激光功率下试样断口的位置如图6所示。从试样的断口位置可以看到,试样没有在焊缝处发生断裂,而是在母材处发生了断裂,表明不同激光功率下焊缝的抗拉伸能力优于母材。不同功率下拉伸试样的抗拉强度平均值如表4所示。4组试样的抗拉强度值基本都在480 MPa以上,超过了Q345B钢的最低抗拉强度460 MPa;虽然超过了母材抗拉强度的最低值,但是比较靠近母材抗拉强度的最低值。由此可见,激光功率对焊缝的抗拉强度有一定的影响,这主要是因为大功率激光自熔焊会造成Q345B钢侧热影响区范围的明显扩大,从而导

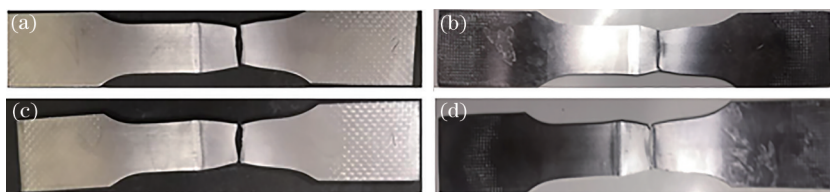


图6 不同激光功率下试样断裂位置。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 6 Fracture positions of the specimens with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

致整体的抗拉强度降低。总的来说,在激光功率从 4 kW 增加到 7 kW 的过程中,抗拉强度没有明显降低,表明激光功率只要在一定的范围内变化,其对抗拉强度的影响有限。此外,利用扫描电子显微镜对 4 组拉伸试样的断口形貌进行分析,发现 4 组试样的断口形貌均呈现如图 7 所示的典型韧窝状,韧窝的深度和直径没有发生较大的变化,因此都属于韧性断裂。

表 4 不同激光功率下焊接试样的抗拉强度

Table 4 Tensile strength of welding specimens with different laser powers

Laser power /kW	Tensile strength /MPa
4	486
5	482
6	482
7	481

3.4 激光功率对焊缝成分及物相的影响

不同激光功率下焊缝中主要元素的质量分数见表 5,相应的 EDS 图谱如图 8 所示。

从图 8 和表 5 可以看出,随着激光功率的增加,C、Cr、Ni 3 种元素的质量分数明显降低,尤其是 Cr、

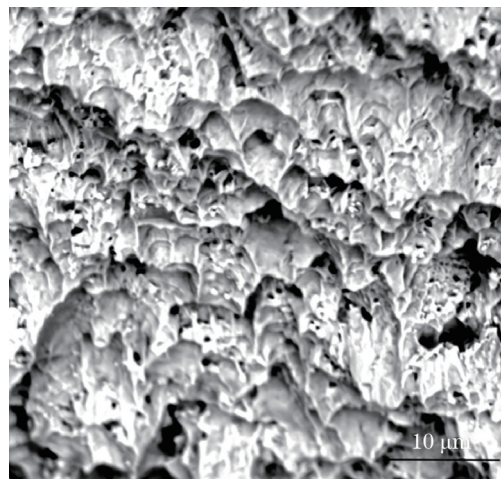


图 7 拉伸断口 SEM 图

Fig. 7 SEM diagram of tensile fracture

表 5 焊缝中主要元素的质量分数

Table 5 Mass fraction of main elements in welds

Power / kW	Mass fraction /%				
	C	Cr	Ni	Mn	Fe
4	0.25	10.61	4.31	0.95	83.88
5	0.13	8.36	4.23	0.85	86.55
6	0.13	7.11	3.82	0.85	85.90
7	0.12	7.05	3.82	0.83	79.86

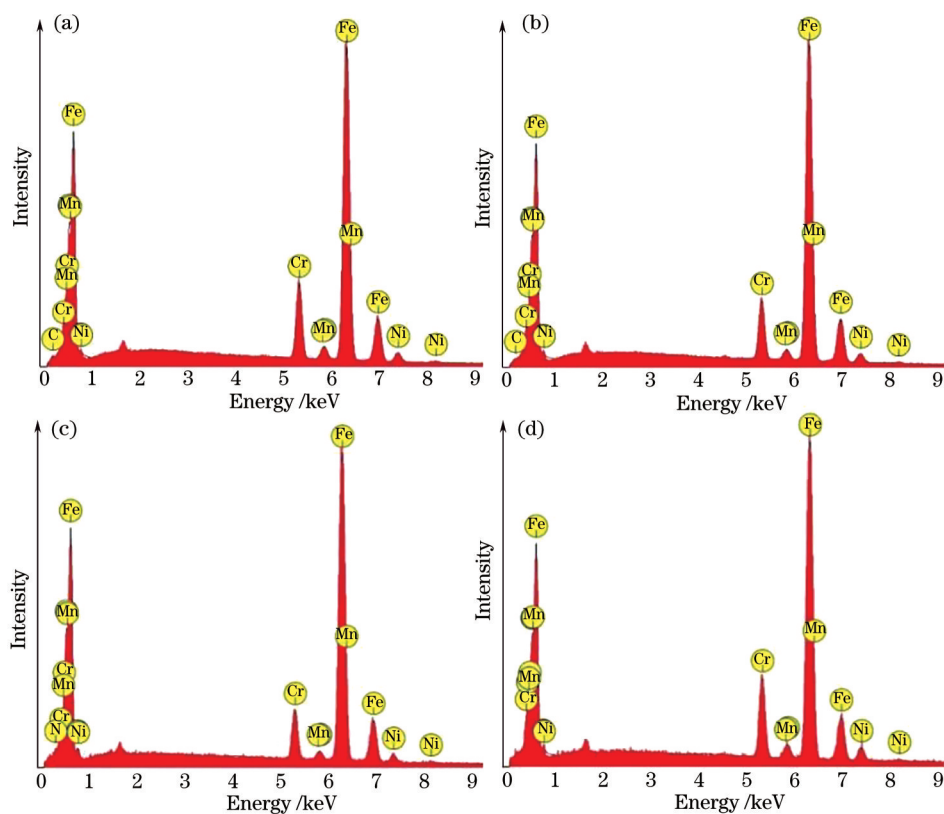


图 8 不同激光功率下焊缝的 EDS 图谱。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 8 EDS profiles of welds with different laser powers. (a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Ni元素的质量分数降低幅度较大。对于C的质量分数减小分析如下:4 kW时,焊缝中C的质量分数达到0.25%,超过了Q345B钢母材中C的质量分数,这是因为C先是从高浓度的Q345B钢母材向低浓度的焊缝扩散,随着扩散过程的进行,焊缝中的C含量逐渐超过母材靠近热影响的区域,但是C的迁移过程却没有停止,而是继续从Q345B钢母材中向焊缝区域扩散,这是因为碳钢母材中C的活度大于焊缝中碳的活度,所以碳也会从C含量低的一侧向C含量高的一侧扩散,在这个过程中,碳迁移的动力不是熔合线两侧的C浓度,而是熔合线两侧C的化学势梯度^[16]。此外,在304不锈钢中存在大量的亲碳元素,如Cr等,这些亲碳元素会吸引碳钢中的C元素,使其穿过熔合线,向焊缝扩散,导致碳钢靠近熔合区的区域C含量下降,焊缝中的C含量升高。而随着激光功率的增大,焊缝中C元素更容易进入304不锈钢侧热影响区并形成Cr₂₃C₆等碳化物,进一步导致焊缝处C含量降低。此外,母材熔化量随着功率的增加而增大,焊缝中C元素的烧损作用逐渐增强,以及C元素在高温下被氧化成CO和CO₂气体挥发,焊缝截面中存在气孔也可以说明这一点。

对于焊缝Cr、Ni元素含量减小的分析如下:在Q345B钢中Cr、Ni元素基本不存在,但是304不锈钢中Cr、Ni元素含量较高,随着激光功率的增加,焊

缝中的Cr、Ni元素含量低于304不锈钢中的Cr、Ni元素含量而高于Q345B钢中的Cr、Ni元素含量,4 kW激光功率下焊缝中Cr、Ni元素含量接近304不锈钢母材的一半。但是随着激光功率的增加,这些元素含量却在逐渐降低,出现这种现象的主要原因就是304不锈钢对激光的反射要大于Q345B钢对激光的反射,即在相同的激光功率下,Q345B钢中吸收的能量要大于304不锈钢,这会导致母材两边的熔化量不一样,使得Q345B钢母材对焊缝组织的贡献量大于304不锈钢,尤其在大功率激光焊接时,这种效应更加明显,因此焊缝中Cr、Ni元素的含量随着激光功率的增加会明显降低。

对于焊缝Fe元素含量减小的分析如下:Fe元素在初期随着激光功率的增加而逐渐增多,这是因为Q345B钢中Fe元素的含量多于304不锈钢中Fe的含量,而Q345B钢熔化的量多于304不锈钢,所以Fe元素初期出现增加的趋势,但是随着激光功率的增大,Fe元素会形成一些化合物或者是中间体,从而降低其含量。从表5和图8还可以看出,Mn元素的含量没有发生明显的变化,主要是因为Mn元素在两种母材中的含量比较均匀,同时Mn元素受到温度以及中间体的影响较小,所以Mn元素的含量基本没有大的变化。

不同激光功率下的焊缝物相XRD分析结果如图9所示。可以看出,在不同激光功率条件下衍射

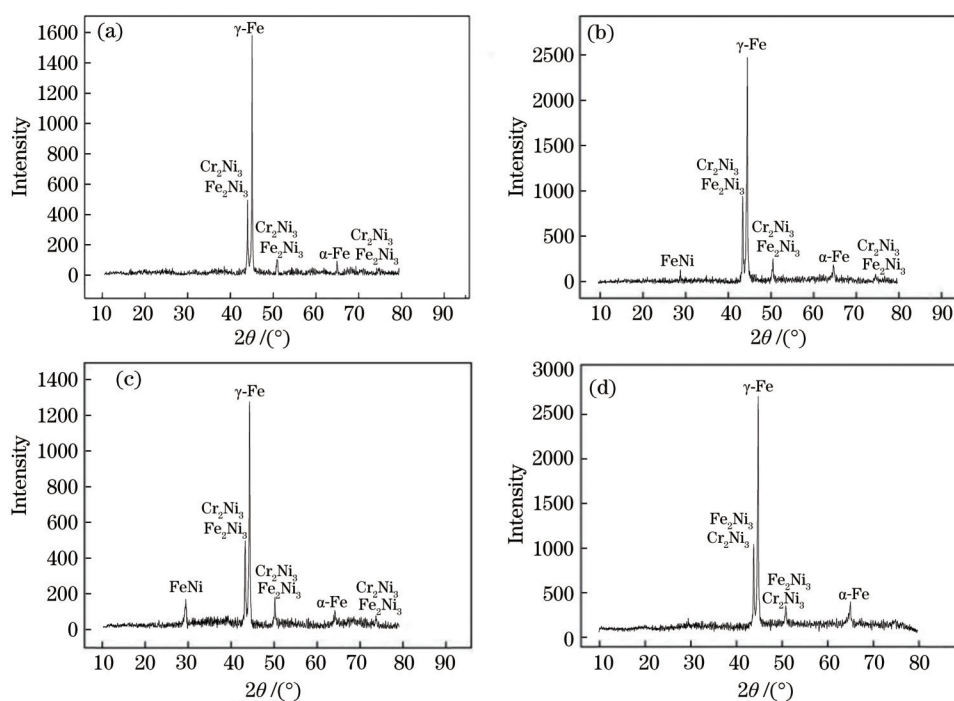


图9 不同激光功率下焊缝的XRD图谱。(a) 4 kW;(b) 5 kW;(c) 6 kW;(d) 7 kW

Fig. 9 XRD patterns of welds with different laser powers. (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 6 kW; (d) 7 kW

峰的强度和峰位基本一致,这表明焊缝中的物相类型基本相同。通过与 PDF 标准卡对比发现,焊缝中主要出现 γ -Fe、 α -Fe、 Cr_2Ni_3 、 Fe_2Ni_3 等组成相,并没有出现大量的 M_{23}C_6 和 σ 相等有害相,这说明采用的焊接工艺和方法是比较合理的,可以防止焊缝出现明显的贫铬现象和大量的脆硬相等中间体,从而导致焊缝的力学性能和耐腐蚀性降低。

4 结 论

激光功率变化对焊缝的宽度影响不大,但是当激光功率为 4 kW 时,焊缝有部分未焊透,激光功率大于 7 kW 时会发生焊穿,激光功率在 4~7 kW 变化的过程中,只有当激光功率为 6 kW 时,焊缝中没有气孔。在激光功率增大过程中,焊缝的组织均为典型的板条状马氏体,激光功率为 6 kW 时焊缝组织存在着大量板条束,每一个板条束内存在很多近似平行排列的细长马氏体板条,这导致焊缝中心的最大硬度在 6 kW 时出现顶峰值。此外,304 不锈钢侧熔合区硬度先出现回升然后缓慢下降,且下降幅度不大;而 Q345B 钢侧则是持续下降。试样抗拉强度没有明显的差异,均在 480 MPa 以上,且试样断裂的位置都在 Q345B 母材,并没有出现在焊缝上,韧窝状的断口形貌表明试样为韧性断裂。随着激光功率的增加,焊缝中 C、Cr、Ni 3 种元素的含量明显降低,尤其是 Cr、Ni 元素含量降低的幅度较大;Fe 元素的含量在初期是随着激光功率的增加而逐渐增大,但是随着激光功率的持续增加,Fe 元素会形成一些化合物或者是中间体,导致其含量降低;Mn 元素的含量没有出现明显的变化。在不同激光功率条件下焊缝中的物相基本相同,主要出现了 γ -Fe、 α -Fe、 Cr_2Ni_3 、 Fe_2Ni_3 等相,并没有出现大量的 M_{23}C_6 和 σ 相等有害相。

参 考 文 献

- [1] Xue S B, Wang B, Zhang L, et al. Development of green welding technology in China during the past decade[J]. Materials Reports, 2019, 33(17): 2813-2830.
薛松柏, 王博, 张亮, 等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2813-2830.
- [2] Li L P, Liang J, Zhao L, et al. Microstructure and mechanical properties of G115/T92 dissimilar welded joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(9): 138-144.
李林平, 梁军, 赵雷, 等. G115/T92 异种钢焊接接头的显微组织及力学性能[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(9): 138-144.
- [3] Li H P, Sheng J M, Li B, et al. Microstructures and properties of laser surface-reinforced 316L stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 191601.
李鸿鹏, 盛金马, 黎彬, 等. 激光表面强化 316L 不锈钢的组织与性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191601.
- [4] Huang B S, Yang J, Bin W J, et al. Effect of aging treatment on corrosion resistance of 316L/Q345 dissimilar steel welded joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(6): 108-113.
黄本生, 杨江, 宾文军, 等. 时效处理对 Q345/316L 异种焊接接头耐腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(6): 108-113.
- [5] Liu J L, Yang S L, Wu H, et al. Microstructure and microhardness of laser welded joints of DP590 high strength steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(1): 223-225.
刘江龙, 杨尚磊, 吴晗, 等. DP590 高强钢激光焊接接头组织与显微硬度分析[J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 223-225.
- [6] Chen X M, Wang X N, Yan Q, et al. Effect of nickle foil on microstructure properties of DP980/A6061 dissimilar laser welded joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102002.
陈夏明, 王晓南, 颜倩, 等. 镍箔对 DP980/A6061 异种激光焊接接头组织性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102002.
- [7] Zhang W, Tang B, Guo Y B, et al. Investigation on surface forming and stability of laser + pulse melting gas metal arc hybrid welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171401.
张旺, 唐彬, 郭彦兵, 等. 激光+脉冲熔化极气体保护复合焊接表面成形及稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171401.
- [8] Zhao Y T, Li B B, Lu H T, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Q235 steel and 316 stainless steel welded joints[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(11): 35-38.
赵勇桃, 李波波, 鲁海涛, 等. Q235 钢与 316 不锈钢异种钢焊接接头组织及力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 35-38.
- [9] Xu W, Wang X G, Men Z X. Microstructure and mechanical properties of 300M laser welded joints of ultra-high strength steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 151407.

- 徐伟, 王晓光, 门正兴. 超高强度钢 300M 激光焊接接头的组织和力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 151407.
- [10] Sun Q J, Li J Z, Liu Y B, et al. Formation, microstructure, and properties of electromagnetic field-assisted SUS316L austenite stainless steel laser narrow-gap joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002005.
- 孙清洁, 李军兆, 刘一搏, 等. 电磁场辅助 SUS316L 不锈钢扫描激光窄间隙焊接接头成形及组织性能[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002005.
- [11] Wu Y, Lei M. Microstructure and properties of laser welded joint of dissimilar steels after hot stamping[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(11): 138-142.
- 吴岳, 雷鸣. 异种钢激光焊接接头热成型后的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 138-142.
- [12] Wang B, Shu L S. Optimization of process parameters of laser cladding 304L alloy powder based on orthogonal experiment[J]. Applied Laser, 2019, 39(4): 580-585.
- 王波, 舒林森. 基于正交试验的 Q235/316 薄钢板激光焊接工艺优化[J]. 应用激光, 2019, 39(4): 580-585.
- [13] Liu J F, Wang W X, Tang Z M, et al. Research on laser welding process of GH4169/1Cr18Ni9Ti dissimilar materials[J]. Applied Laser, 2018, 38(2): 241-244.
- 刘巨锋, 王维新, 唐众民, 等. GH4169/1Cr18Ni9Ti 异种材料激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 241-244.
- [14] Serizawa H, Mori D, Shirai Y, et al. Weldability of dissimilar joint between F82H and SUS316L under fiber laser welding[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9/10): 2466-2470.
- [15] Zhang Y. Study on microstructures and properties of laser welded joints of titanium alloy/stainless steel dissimilar materials[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- 张岩. 钛合金/不锈钢异种材料激光焊接接头微观组织及力学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [16] Liu D Y, Li D, Li K B, et al. Microstructure analysis of fiber laser welding between E36 and 304 stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041403.
- 刘东宇, 李东, 李凯斌, 等. E36 与 304 异种金属光纤激光焊接接头的组织分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041403.